

**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ
И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

Из эпюры перепада давления (см. рис. 6) видно, что профиль перепада давления аналогичен изменению профиля скорости. Результаты, полученные при различных значениях динамической вязкости, подтверждают пропорциональную зависимость между перепадом давления на гидравлические сопротивления и вязкостью. А это доказывает, что постоянная C – суммарный перепад давления.

Учитывая, что вязкость является функцией как минимум от двух переменных (концентрация, температура), определение зависимости потерь давления напрямую от концентрации соли в растворе требует для установления зависимости проведение многофакторного эксперимента.

При исследовании границ применимости задачи было установлено, что восходящий поток в затрубном пространстве в процессе бурения характеризуется ламинарным режимом течения жидкости. Данная модель может использоваться при гидродинамическом моделировании процесса бурения многолетнемерзлых пород с использованием растворов солей. Расширение границ применимости решения может быть осуществлено при корректировке модели, допускающей применение для неньютоновских жидкостей (Бингама-Шведова, Оствальда-де Ваала); структурных, переходных, турбулентных режимов течения; суспензий (взвешенных частиц в жидкости); тепло-массообменных процессов.

Литература

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 стр.;
2. Слезкин Н. А., Динамика несжимаемой жидкости: учебное издание. – М.: "Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955г. - 520 стр.;
3. Clive L. Dym Introduction to Engineering Mechanics: A Continuum Approach / Clive L. Dym, Jenn Stroud Rossmann. – London: CRC Press, 2008. – P. 472.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Д.А. Федотов, В.В. Шаламов

Научный руководитель – профессор Харламов С.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Загрязнение почв происходит в местах добычи, транспортировки, хранения и переработки нефти. Перед началом дорожных работ по экскавации грунта необходимо знать глубину проникновения загрязнителя. В этом нам может помочь математическое моделирование, которое позволяет оценить величину загрязненной зоны.

Целью работы является исследование особенностей фильтрации нефти в почву, анализ математической модели двухфазной фильтрации, учитывающей движение загрязнителей и воздуха в почве. Основными уравнениями, которые описывают движение нефти в грунте, являются уравнение сохранения массы и уравнение сохранения импульса, которое сводится к закону фильтрации Дарси.

Закон сохранения массы и закона фильтрации Дарси для трехмерного течения имеют вид [2]:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

где m – пористость грунта, м³; s – насыщенность; t – время, с; ρ – плотность, кг/м³; \vec{u} – скорость, м/с.

$$\vec{u} = -k \frac{k(s)}{\mu} (\nabla p - \rho \vec{g}), \quad (2)$$

где k – проницаемость пористой среды, м²; μ – вязкость, Па·с; p – фазовое давление, Па; \vec{g} – ускорение свободного падения, м²/с.

Подставим в уравнение неразрывности закон Дарси, в результате чего с учетом соотношения для капиллярного давления получим [2]:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} = \left(\left(-\frac{k}{\mu_1 \frac{\mu_2}{\mu_1} k_1(s) + k_2(s)} \right) \frac{\partial p_c(s)}{\partial z} \right) - \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\mu_2 k_2(s)}{\mu_1 k_1(s) + k_2(s)} \rho_1 g + \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial}{\partial z} \frac{k_1(s) k_2(s)}{\mu_1 k_1(s) + k_2(s)} \rho_2 g \quad (3)$$

где k_1, k_2 – фазовые проницаемости нефти и воздуха соответственно, м²; μ_0 – отношение вязкостей нефти и воздуха; ρ_1, ρ_2 – плотность нефти и воздуха соответственно, кг/м³; p_c – функция капиллярного давления.

Чтобы установить связь между капиллярным давлением P_c , пористостью и проницаемостью среды воспользуемся функцией Леверетта [1]:

$$P_c(s) = \frac{\sigma \cos \theta}{(k/m)^{0.5}} J(s), \quad J(s) = \frac{(k/m)^{0.5}}{\sigma \cos \theta} P_c(s) \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение, Дж/м²; θ – угол смачивания, градусы.
С учетом функции Леверетта уравнение (3) можно преобразовать к виду:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(a(s) \frac{\partial s}{\partial z} \right) - \frac{k \rho_1 g}{\mu_1} \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\text{где } a(s) = -\frac{k}{\mu_1} \psi \frac{\partial p_c}{\partial s} = a_0 \psi \frac{\partial J(s)}{\partial s}, \quad a_0 = -\frac{\sigma \cos \theta}{\mu_1} \sqrt{km}.$$

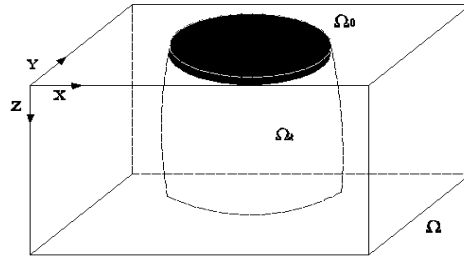
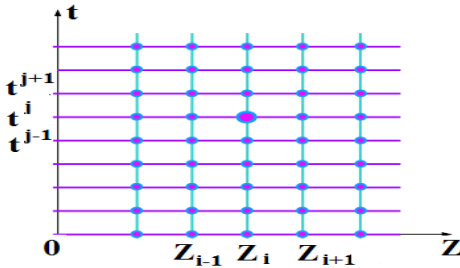
Введем начальные и граничные условия:

$$\text{– при } t=0: s(z,0) = 0, \quad (6)$$

$$\text{– на верхней границе условие для насыщенности нефтью записывается следующим образом:} \\ s(0,t) = s_0, \quad (7)$$

$$\text{– на нижней границе } \frac{\partial s}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений является конечно-разностный метод.



Построим разностную схему с помощью равномерной сетки с шагом τ по времени t и шагом h_z по переменной z . Получим следующую сеточную область [3]:

$$w_{h,\tau} = \{t_j = j\tau (0 \leq j \leq N_t), z = ih_z (0 \leq i \leq N_z)\}.$$

Заменяем конечно-разностными отношениями производные во внутренних узлах сеточной области. В результате получим неявную абсолютно устойчивую разностную схему:

$$\frac{s_i^{j+1} - s_i^j}{\tau} = \frac{\left[a_{i+1/2}^{j+1} (s_{i+1}^{j+1} - s_i^{j+1}) - a_{i-1/2}^{j+1} (s_i^{j+1} - s_{i-1}^{j+1}) \right]}{h^2} + f(s_i^{j+1}), \quad (9)$$

С аппроксимацией начально-граничных условий

$$s_i^0, j=0, i=0, \dots, N_z; \quad s_0^{j+1} = 1, i=0, j=0, \dots, N_t - 1.$$

Решение разностной схемы (9) можно произвести методом Гаусса или прогонки. Воспользуемся методом прогонки. Преобразуем неявную разностную схему к виду, удобному для использования метода прогонки

$$A_i s_{i-1}^{j+1} - C_i s_i^{j+1} + B_i s_{i+1}^{j+1} = -F_i, \quad (10)$$

$$\text{где } A_i = \frac{\tau}{h^2} a_{i-1/2}^{j+1}, \quad B_i = \frac{\tau}{h^2} a_{i+1/2}^{j+1}, \quad C_i = 1 + A_i + B_i, \quad F_i = s_i^j + \tau f_i^j,$$

с крайними условиями:

$$s_N = \chi_2 s_{N-1} + \nu_2, s_0 = \chi_1 s_1 + \nu_1 \quad (11)$$

Численное решение задачи получим, используя формулы метода прогонки:

Сначала выполняем прямой ход прогонки, помогающий найти коэффициенты α и β :

**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ
И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

$$\alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{A_i B_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

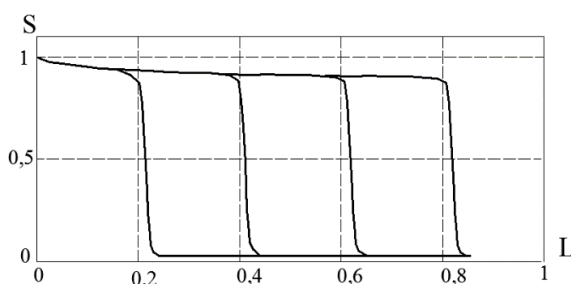
Затем выполняется обратный ход, дающий значения насыщенности:

$$s_i = \alpha_{i+1} s_{i+1} + \beta_{i+1}. \quad (13)$$

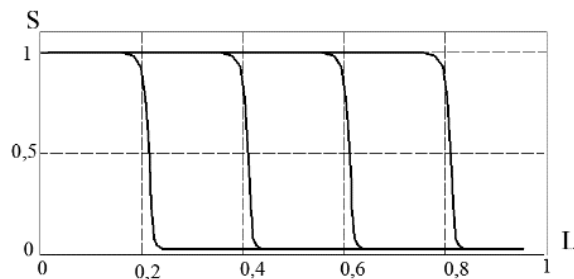
Прогночные коэффициенты α_1, β_1 находим из краевого условия на левом конце, s_N находим из краевого условия на правом конце и последнего из уравнений (11) при $i = N-1$

$$s_0[0] = 1, \alpha_1 = 0, \beta_1 = s_0[0], \quad s_N = \frac{v_2 + \chi_2 \beta_N}{1 - \chi_2 \alpha_N}.$$

Вычислительный алгоритм реализуется при помощи компьютерной модели. Построенная модель позволяет определить значения насыщенности s_i и скорости фильтрации загрязнителя в грунте. Для исследования фильтрации были выбраны песок и суглинок.



**Рис. 3 Динамика распространения фронта
загрязнения насыщенности (S) в зависимости от
глубины (L) в суглинок**



**Рис. 4 Динамика распространения фронта
загрязнения насыщенности (S) в зависимости от
глубины (L) в песок**

Установлено, что скорость фильтрации у песка была больше, чем у суглинка (время фильтрации в песок на глубину 1 метр составило 22 часа, а для суглинка время фильтрации составило 39 часов).

Сопоставления результатов расчета по представленной модели фильтрации с экспериментальными данными показывают, что модель адекватна реальному процессу загрязнения. При известных фильтрационных свойствах среды модель успешно описывает интенсивность миграции и динамику распространения различных загрязнителей.

Литература

1. Бочаров О.Б. Сравнение модели фильтрации несмешивающихся жидкостей с фазовыми подвижностями с моделью Маскета-Левеверетта / О. Б. Бочаров, И. Г. Телегин // Теплофизика и аэромеханика. 2004. – С. 597 – 605.
2. Молокова Н.В. Математическое моделирование процессов нефтезагрязнения пористой среды // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. Вып. 5. – Красноярск, 2010. – С. 142 – 148.
3. Тихонов А.Н. Разностные методы решения многомерных задач. – М.: Наука, 1989. – 320 с.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКУ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД

Д.Р. Шабает, К.Г. Федюшкин

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. На сегодняшний день наиболее эффективным средством транспортировки нефти и нефтепродуктов является трубопроводный транспорт. Очень важно снизить экономические затраты на перекачку нефти и нефтепродуктов, а для этого необходимо учитывать факторы, влияющие на теплообмен и гидродинамику при движении нефти по трубопроводу. На гидродинамику и теплообмен влияют множество факторов такие как вязкость, температура, плотность нефти, шероховатость, различные примеси и др.

Следует заметить, что в настоящее время на разрабатываемых месторождениях Западной Сибири все больше вовлекается в добычу высокопарафинистая и высоковязкая нефть, которая является высокозастывающей,